

Til: **Energi Norge**  
v/ Dr Leif Basberg  
Kopi til:  
Dato: 2016-08-01  
Rev.nr. / Rev.dato: 0 / --  
Dokumentnr: 2015 0624-01-TN  
Prosjekt: **Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv**  
Tittel på notatet: **Anvendelse av risikovurdering i norsk damsikkerhetsarbeid**  
Prosjektleder: Suzanne Lacasse  
Utarbeidet av: Suzanne Lacasse  
Kontrollert av: Kaare Høeg og Farrokh Nadim

---

## Innhold

<b>1</b>	<b>Formål med sluttnotatet</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Bør risikovurdering anvendes for norske dammer</b>	<b>2</b>
2.1	Om risikovurdering	2
2.2	Anvendelse for norske dammer	3
<b>3</b>	<b>Hvilket risikonivå kan aksepteres</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Metoder som kan anvendes for risikovurdering av dammer</b>	<b>4</b>
4.1	Probabilistiske metoder for dammer	4
4.2	Tilfellet med ekstreme hendelser	6
4.3	Deterministiske og probabilistiske analyser	6
<b>5</b>	<b>Anbefalinger</b>	<b>6</b>
5.1	Risikovurdering av norske dammer	6
5.2	Videre arbeid	7
<b>6</b>	<b>Referanser</b>	<b>7</b>

## 1 Formål med sluttnotatet<sup>1</sup>

Dammer er og har vært svært viktige for kraftproduksjon og flere andre formål i Norge. De kan imidlertid også innebære en fare for samfunnet om sikkerheten ved anleggene ikke ivaretas. Gjennom to tiår fram til midten av 1970-tallet skjedde en rekke alarmerende dambrudd og hendelser, for eksempel med Vega de Tera Dam (Spania), Malpasset Dam (Frankrike), Vajont Dam (Italia), Baldwin Hills, Nedre Van Norman, Buffalo Creek Dams og den nybygde Teton Dam (alle i USA) som forårsaket voksende bekymring. Resultatet ble et fornyet fokus på damsikkerhet i en rekke land.

Energi Norge engasjerte NGI til å vurdere muligheter og avgrensninger ved bruk av risikoanalyser for norske dammer. Vurderingen besto av:

- «State-of-the-art» om risikoanalyser for dammer i et nasjonalt og internasjonalt perspektiv.
- Vurdering av risiko for dambrudd for Dam Dravladalen (valgt som et eksempelstudie).

Energi Norge-prosjektet har som mål å gi anbefalinger om anvendelse av risikovurdering av dammer i Norge. To rapporter til Energi Norge (NGI 2016a; 2016b) presenterer henholdsvis «State-of-the-art» om risikoanalyser for dammer og resultatene av risikoanalyser for Dam Dravladalen.

Dette sluttnotatet gir anbefalinger om anvendelse av risikovurdering for dammer i Norge og retningen for videre arbeid. Notatet ønsker samtidig å skape en felles plattform for risikoanalyser av norske dammer.

## 2 Bør risikovurdering anvendes for norske dammer

### 2.1 Om risikovurdering

I utlandet brukes risikovurdering av dammer i Australia, Canada, Spania, UK, USA, Japan og til dels Sverige. Risikovurdering og risikohåndtering brukes i økende grad i dag for alle typer bygg og anlegg, infrastruktur og store konstruksjoner. Den mest utbredte bruken er innen olje- og gassutvinning, kjernekraftindustrien, dammer, gruveindustrien og miljøteknologi. Innen de fleste av disse aktivitetsområdene er Norge blant de mest aktive landene med hensyn til bruk av risikovurdering, sammen med Australia, Canada, USA, Hong Kong og noen land i Asia.

Målet med en risikovurdering er å evaluere usikkerheter i en analyse og kvantifisere deres effekt på sikkerheten. Tradisjonelle (deterministiske) analyser kan ikke gi et komplett bilde av sikkerheten fordi usikkerhetene påvirker selve sikkerhetsvurderingen. Fordelene med å gjennomføre risikoanalyser av dammer er mange.

- ✚ Risikoanalyser kan omfatte dambrudd som et resultat av uvanlige kombinasjoner av vanlige hendelser snarere enn kun som et resultat av ekstreme hendelser.

---

<sup>1</sup> En risikovurdering av også en annen dam i Norge vil bli utført. Sluttnotatet vil oppdateres når resultatene fra den andre analysen foreligger.

- ✦ Risikoanalyser gir muligheten til å kombinere resultater fra ingeniørbaserte analyser, observasjoner, tidligere erfaring, statistiske verdier, ekspertvurderinger og annen informasjon og data i en beslutningsprosess med hovedhensikt å skaffe beslutningsgrunnlag for risikostyring. Dette passer godt til en kompleks konstruksjon som et damanlegg.
- ✦ Resultater fra risikoanalyse egner seg best til å sammenligne sikkerheten av dammer med andre dammer og andre konstruksjoner, og for å uniformere sikkerheten av forskjellige dammer, for eksempel, dammer i samme konsekvensklasse.
- ✦ Risikoanalyser egner seg godt til å sammenligne forskjellige utfall i en kost-nytte analyse.
- ✦ Resultatene fra risikoanalyser kan anvendes over dammens levetid og kan justeres ved en ekstrem hendelse eller ved observasjoner (positive eller negative) av dammens oppførsel.
- ✦ Gjennomføring av en risikoanalyse fordrer en proaktiv tankegang og en identifisering av aktuelle og potensielle problemområder. Dette gir et begrunnet grunnlag for å iverksette tiltak for reduksjon av risiko og for å optimalisere bruken av ressurser på tiltak.
- ✦ Detaljeringsnivået på analysene velges ut fra formålet og omfanget for analysen. Selv en grovanalyse av risikoen vil bli nyttig for identifisering av risikokilder og problemområder.
- ✦ Risikobegreper letter kommunikasjonen blant fagområdene, myndigheter og publikum.
- ✦ Oppfatningen av at risikoanalyser er kompliserte og dyre å gjennomføre gjelder ikke lenger. Utvikling av metodene og utvidelse av anvendelsesområdene gjør at metodikken og programpakken er lett tilgjengelige, og konseptene kan benyttes uten stor vanskelighet.

## 2.2 Anvendelse for norske dammer

Risikovurdering av norske dammer bør brukes i følgende tilfeller:

- ✦ Dammer i høy konsekvensklasse (konsekvensklasse 3 og høyere), spesielt med tanke på å uniformere sikkerheten for slike dammer i Norge.
- ✦ Dammer hvor det observeres en endring i oppførsel eller hvor det forventes en endring in ytre belastning (for eksempel grunnet klimaendringer).
- ✦ Dammer hvor dameieren må velge den(de) mest effektive rehabiliteringstiltak.
- ✦ Dammer hvor det er behov for kost-nytte analyser for å vurdere den mest effektivt bruken av vedlikeholdsbudsjettet.
- ✦ Dammer hvor det er relativt store kostnader forbundet med en eventuell rehabilitering eller andre endringer i forhold til opprinnelig dimensjonering.
- ✦ I en større dampportefølje for å sikre at de riktige tiltakene prioriteres og blir gjennomført.
- ✦ Dammer eller serier av dammer hvor det er 'fare' (mulighet) for "påfølgende" effekter ("cascading effects") og store skader på infrastrukturen og miljø.
- ✦ Når det er et ønske om å velge riktig instrumentering for overvåkning og oppfølging.
- ✦ Ved planlegging av beredskapstiltak i forbindelse med et potensielt dambrudd.
- ✦ Dammer som kan være utsatt for terrorisme eller sabotasje.

### 3 Hvilket risikonivå kan aksepteres

NGI rapportene (2016a; 2016b) presenterer veiledninger for akseptabel risiko basert på praksis i flere land. Resultatene er oppsummert i Figur 1a i såkalte 'F-N' kurver som viser årlig sannsynlighet for dambrudd (F for frekvens) versus antall forventet dødsfall (N for antall). NGI anbefaler at den oransje F-N kurven i Figur 1b brukes som veiledende akseptabel risiko for norske dammer. NGIs anbefaling følger tilnærmet de siste retningslinjene fra Canada, USA<sup>2</sup> og Hong Kong, og ligger nær anbefalingen for dammer i New South Wales (NSW) i Australia. Hvis risikoanalysen viser at det kan være så mange som 1.000 forventet omkomne er det påkrevet med helt spesielle analyser (som nevnt i Seksjon 4).

### 4 Metoder som kan anvendes for risikovurdering av dammer

#### 4.1 Probabilistiske metoder for dammer

Metodene er delt i tre kategorier: kvalitative metoder, enklere kvantitative metoder og mer omfattende kvantitative metoder. Metodene nedenfor anses som de mest egnede for analyser av risiko for dammer og er forklart i NGI (2016a; 2016b).

Metodene kan kombineres, og kobling av flere metodikker er ofte benyttet. Hendelsestre-analyse og Bayesisk nettverk er anbefalt som de mest anvendelige og nyttige metoder

#### *Kvalitative metoder*

- ✚ Risikomatriser med kvalitativ vurdering av fare (sannsynlighet for brudd) og konsekvens.
- ✚ FMEA<sup>3</sup> med kvalitativ identifisering av bruddmekanismer og effekter.
- ✚ FMECA<sup>3</sup> med identifikasjon av bruddmekanismer, effekter, kritikalitet og tiltak.
- ✚ LCI (Life-Cycle Inventory) diagrammer.
- ✚ "The Observational Method" hvor analyser med best estimat og med verst tenkelige parametere er gjennomført og beredskapstiltak for uventede hendelser er planlagt).

#### *Enklere kvantitative metoder*

- ✚ Feiltre-analyse (ofte i kombinasjon med hendelsestre-analyse).
- ✚ Hendelsestre-analyse.
- ✚ Bayesisk oppdatering i lys av hendelser og observasjoner.

#### *Omfattende kvantitative metoder*

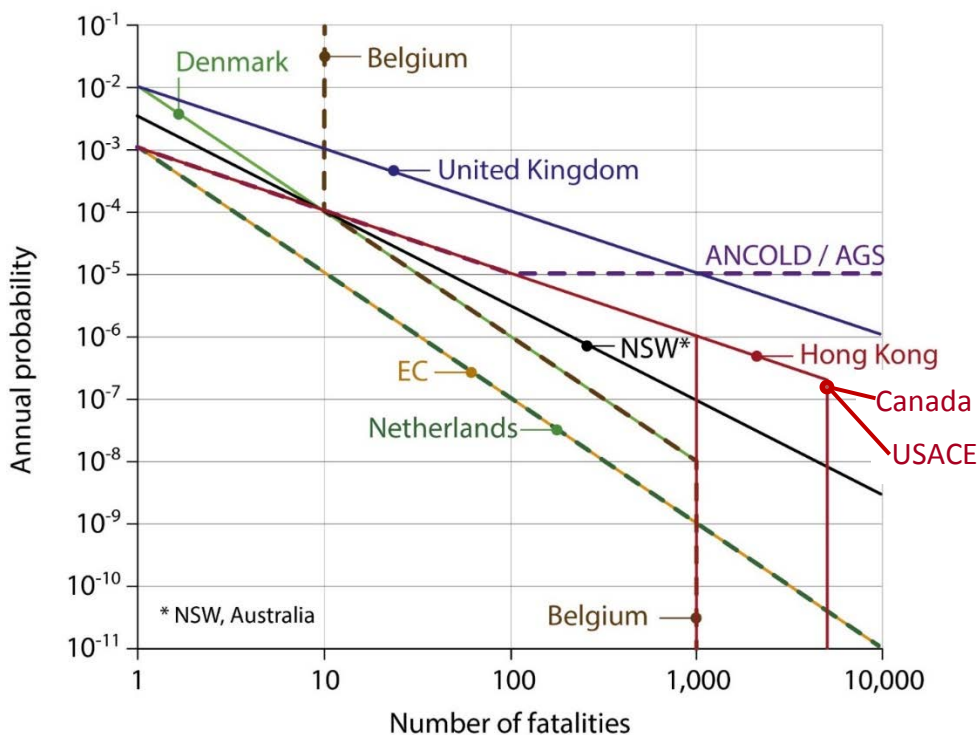
- ✚ Hendelsestre-analyse koblet med Monte Carlo simulering.
- ✚ Bayesisk nettverk ("Bayesian Network").
- ✚ Bayesisk nettverk koblet med Monte Carlo simulering.
- ✚ FORM /SORM<sup>4</sup> analyser av enkelte mekanismer som kan uttrykkes eksplisitt matematisk.

---

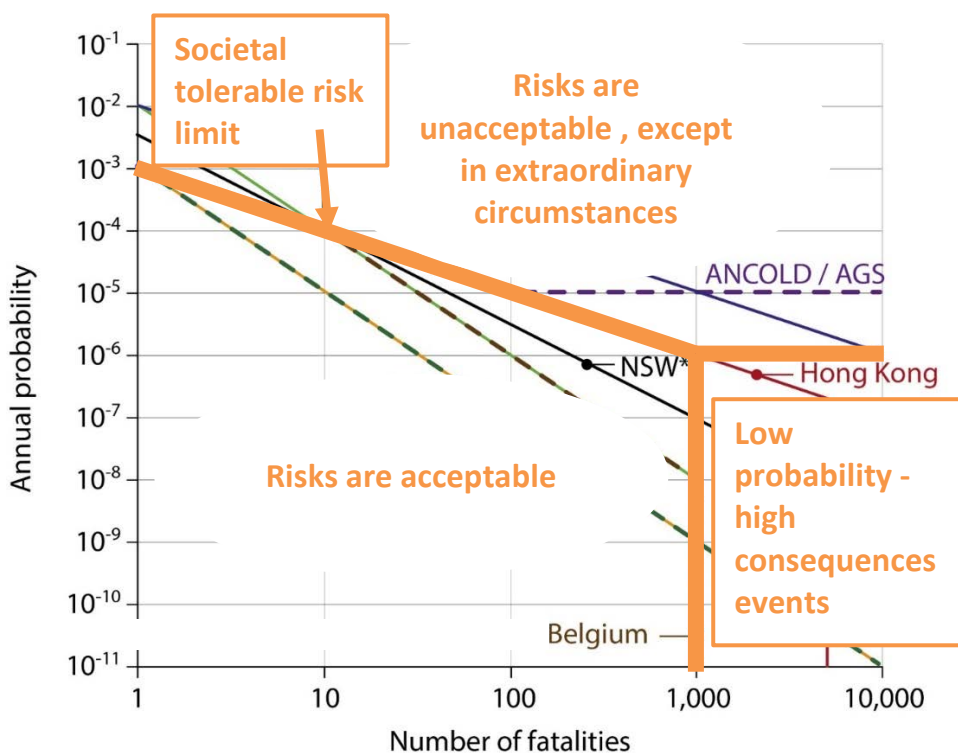
<sup>2</sup> US Army Corps of Engineers, USACE

<sup>3</sup> FMEA = Failure Mode and Effect Analysis  
FMECA = Failure Modes, Effects and Criticality Analysis

<sup>4</sup> FORM = First Order Reliability Method  
SORM = Second Order Reliability Method



Figur 1a. Veiledning for akseptabel risiko i flere land.



Figur 1b. NGIs anbefaling for akseptabel risiko for norske dammer (linjer og tekst i oransje).

## 4.2 Tilfellet med ekstreme hendelser

For en hendelse som har 'meget lav sannsynlighet og meget høye konsekvenser', for eksempel maksimum flom (PMF), tsunami eller jordskjelv med veldig lang returperiode, er det vanskelig å bruke probabilistiske metoder alene fordi det er liten erfaring som kan bidra til å tallfeste sannsynligheter. Ekstreme hendelser vil forårsake mange dramatiske og alvorlige konsekvenser først (kollaps i transportmidler, strømbrudd, omfattende evakuering etc) før en dam eventuelt vil gå til brudd. De fleste samfunnsmessige sikkerhetsberedskapstiltak vil allerede ha vært utløst. En system-analyse i et slikt tilfelle kan gjennomføres med "stress testing"-metoden kombinert med enkelte av de probabilistiske metoder nevnt ovenfor. "Stress testing" er brukt i dag i kjernekraftindustri og for å teste flysikkerhet og sårbarhet i bank-bransjen.

## 4.3 Deterministiske og probabilistiske analyser

NVEs regelverk er ikke til hinder for at risikovurderinger kan benyttes. Tvert imot kan risikovurderinger være et nyttig verktøy i NVEs vurdering av damsikkerhet. I Norge er sikkerhetskravene for dammer standardbaserte. Forskriftene setter eksplisitte konstruksjonsmessige krav til dammer.

Argumentene mot en risikobasert sikkerhetsdokumentasjon er oftest at risikoanalysene innebærer større grad av subjektivitet og er vanskeligere etterprøvbare enn eksplisitte dimensjoneringskriterier og deterministiske analyser. Målet med risikovurderingsmetodikken er nettopp å kvantifisere usikkerhetene i en analyse. Det er viktig å være klar over at de samme usikkerhetene som kvantifiseres i en risikoanalyse er også en del av de deterministiske analysene. Risikoanalysene bringer inn ny innsikt til de forskriftmessige analysene, dimensjoneringskrav og beslutninger om dammens sikkerhet.

Deterministiske analyser og probabilistiske analyser kompletterer hverandre. De bør brukes sammen for å gi maksimum informasjon om en dams sikkerhet.

# 5 Anbefalinger

## 5.1 Risikovurdering av norske dammer

NGI anbefaler at risikovurderinger anvendes oftere for norske dammer. Det ble utført risikoanalyser for flere norske dammer i 1996. Analysene fra 1996 representerte "State-of-the-Art" den gang. Norge var da et foregangsland med bruk av risikovurdering for dammer. En av de første risikokonferanser med stor internasjonale deltagelse ble arrangert i Trondheim i 1997.

Analysene av Dam Dravladalen fra 1996 førte til at en viktig, og til da nærmest oversett, bruddmekanisme ble identifisert, og at sikkerheten mot den bruddmekanismen var for lav. Nye analyser i 2016 dokumenterte effektiviteten av rehabiliteringstiltakene som ble utført mellom 1996 og 2012. Sannsynlighet for brudd ble betydelig redusert med rehabiliteringstiltakene<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup> I prosjektet for Energi Norge vil risikovurdering av en dam til, i tillegg til risikoanalysen for Dam Dravladalen, bli utført.

Det er en økende trend for bygg og anlegg, for naturfarer og i energisektoren hvor risikovurderinger blir pålagt. Det er enighet om at risikovurderinger gir et bedre og mer komplett bilde av den virkelige sikkerheten enn deterministiske analyser alene. Man bør bruke risikovurderinger for dammer i Norge som i de andre foregangslandene.

NGI anbefaler en utveksling av data og erfaringer innenfor områdene damoppførsel og risikovurderinger. På dette stadiet av utviklingen av risikovurdering for norske dammer er det viktig at data og erfaringer utveksles nasjonalt og internasjonalt for å unngå kunnskapsbegrensinger og for å forsikre at data brukes riktig. Det anbefales at Energi Norge inngår et samarbeid med US Army Corps of Engineers, Bureau of Reclamation og BC Hydro og/eller sentrale aktører i Østerrike, Sveits og Sverige. USACE har blant annet et program som omfatter risikovurdering for samtlige av sine dammer i USA.

NGI anbefaler en gradvis endring i dimensjoneringspraksis for dammer i Norge. Probabilistiske vurderinger og risikoanalyser med fastsatt minimum pålitelighetsindeks eller maksimum sannsynlighet for brudd bør kunne anvendes sammen med deterministiske analyser, for å dokumentere sikkerheten av en dam.

## 5.2 Videre arbeid

Det bør vurderes å etablere et program hvor risikovurdering foretas for alle dammer i Norge med konsekvensklasse 3 og høyere, og ved viktige beslutningsmilepæler som presentert i Seksjon 2.2.

For å kunne øke kunnskapen om probabilistiske analyser og risikovurderinger innen dambransjen, anbefaler NGI at det etableres en serie kurs om metodikken. Kursene bør inneholde mange anvendelseseksempler. Kursene kunne gis i regi av Energi Norge (eller andre). Dam-eksempler på kursene bør velges blant klasse-3 og -4 dammer. På denne måten vil gradvis flere norske dammer bli vurdert risikomessig. Realistisk sett kan antagelig ikke en fullstendig risikoanalyse med dokumentasjon kompletteres som en del av ett kurs, men med litt etterarbeid kan analysene dokumenteres grundigere.

## 6 Referanser

NGI (2016a). Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv. "State-of-the-Art" om risikoanalyser for dammer. NGI rapport til Energi Norge. Rapportnr 2015 0624-01-R-01. Datert 2016-06-01 (*Utkast*).

NGI (2016b). Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv. Risikovurdering for Dam Dravladalen. NGI rapport til Energi Norge. Rapportnr 2015 0624-01-R-02. Dated 2016-06-01 (*Utkast*).